



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Marek Martaus

Automatizace testování křemíkových detektorů pro experiment ATLAS Upgrade

Ústav částicové a jaderné fyziky

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Kodyš Peter, CSc.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Obecná fyzika

Praha 2018

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V dne

Podpis autora

Rád by som sa poďakoval vedúcemu práce, RNDr. Petrovi Kodyšovi, CSc., za príkladné vedenie práce a množstvo konzultácií, pri ktorých mi vždy ochotne poradil a pomohol. Veľká vďaka patrí celej skupine, s ktorou pracujeme už dlhšiu dobu a vždy mi v prípadnej núdzi vedeli poradiť. Na záver by som rád poďakoval mojej priateľke a spolužiačke, Lýdii Janitorovej, ktorá mi je v priebehu celého štúdia veľkou oporou.

Název práce: Automatizace testování křemíkových detektorů pro experiment ATLAS Upgrade

Autor: Marek Martaus

Institút: Ústav časticové a jaderné fyziky

Vedoucí bakalářské práce: RNDr. Kodyš Peter, CSc., Ústav časticové a jaderné fyziky

Abstrakt: Po mnohých rokoch fungovania Veľkého hadrónového urýchľovača je nutná jeho modernizácia. Nasledujúca modernizácia bude zahŕňať aj vylepšenie detektoru ATLAS. Táto práca je venovaná práve vývoju pracovných postupov pri testovaní kremíkových stripových detektorov použitých v novom vnútornom detektore ATLASu. Pre potreby práce bola zvolená metóda testovania laserom. V prvých kapitolách tejto práce sa čitateľ dozvedá o princípe polovodičových detektorov, ich testovaní a použití v ATLASE. Štvrtá kapitola je venovaná popisu použitých prístrojov. V piatej kapitole sú uvedené výsledky testovania modulu. Diskusii nameraných výsledkov je venovaná šiesta kapitola.

Klíčová slova: ATLAS Upgrade, vnútorný dráhový detektor, polovodičové detektory, laser test

Title: Automation of Semiconductor Detector Tests for ATLAS Upgrade

Author: Marek Martaus

Institute: Institute of Particle and Nuclear Physics

Supervisor: RNDr. Kodyš Peter, CSc., Institute of Particle and Nuclear Physics

Abstract: After many years of operation of a Large Hadron Collider, it is necessary to modernize it. The next upgrading will also include an ATLAS detector upgrade. This work is devoted to the development of workflows of testing the silicon strip detectors used in the new ATLAS inner detector. The laser testing method was chosen for the needs of this work. In the first chapters of this work, the reader will learn about the principle of semiconductor detectors, their testing and use in ATLAS. The fourth chapter is devoted to the description of used equipment. The fifth chapter shows the results of the module testing. Discussion of measured results is devoted to chapter six.

Keywords: ATLAS Upgrade, inner tracker, semiconductor detectors, laser test

Obsah

Úvod	3
1 Polovodičové detektory	4
1.1 Polovodiče	4
1.1.1 Typy polovodičov	4
1.1.2 Vytváranie nositeľov náboja	5
1.1.3 p-n prechod	5
1.2 Polovodiče ako detektory	6
1.2.1 Princíp	6
1.2.2 Odporové delenie náboja	6
1.2.3 Vyčítanie signálu z elektród	7
1.2.4 Šum	8
2 ATLAS upgrade	9
2.1 Experiment ATLAS	9
2.1.1 Vnútorý dráhový detektor	9
2.1.2 Magnetický systém	10
2.2 ATLAS upgrade	11
3 Metódy testovania detektorov	12
3.1 Threshold scan	12
3.2 Strobe delay scan	12
3.3 Response curve	12
3.4 Three point gain (3PG)	13
3.5 Noise occupancy scan	13
3.6 Repeating burst	13
4 Popis experimentálneho zariadenia	14
4.1 Testovaný modul	14
4.2 Vyčítanie a spracovanie signálu	16
4.3 Chladenie	17
4.4 Laser	17
4.4.1 Pohyb lasera	17
4.4.2 Zaostreňovanie lasera	18
4.5 Napájanie	19
5 Výsledky merania	21
5.1 Prevod mV na fC	21
5.2 Šum detektoru	22
5.3 Vlastné meranie	22
6 Diskusia	25
6.1 Diskusia výsledkov merania	25
6.2 Mŕtve kanály	26
Záver	27

Zoznam použitej literatúry	28
Zoznam obrázkov	29
Zoznam tabuliek	30
Zoznam použitých skratiek	31
A Prílohy	32
A.1 Použité makro	32

Úvod

Už odpradáva sa ľudia pokúšajú zistiť, z čoho sa skladá hmota okolo nás. Snažili sa vymyslieť metódy na pozorovanie čoraz menších vecí. Použitie šošoviek viedlo k obrovskému pokroku v tomto smere. To však postupne nestačilo, pretože ako už dnes vieme, elementárne častice, z ktorých sa skladá svet okolo nás, môžeme pozorovať iba nepriamo. Detektory častíc nám teda otvárajú dvere k poznaniu a skúmaniu najmenších stavebných prvkov hmoty.

Systém detektorov ATLAS je jeden zo štyroch experimentov umiestnených na Veľkom hadrónovom urýchľovači - Large Hadron Collider (LHC) - v CERNe. Od roku 2010, kedy experiment ATLAS zaznamenal častice z prvej zrážky na LHC, slúži na hľadanie odpovedí na otázky, týkajúce sa základných kameňov hmoty. Už v roku 2012 sa pomocou neho podarilo objaviť časticu odpovedajúcu Higgsovmu bozónu, o ktorom sa dlho hovorilo iba v teoretickej rovine, no jeho objavenie bolo dôležitým krokom k potvrdeniu štandardného modelu.

V tejto práci sa budeme podrobne venovať polovodičovým detektorom, ktoré sa nachádzajú vo vnútornom detektore ATLASu. Ako už napovedá jeho názov, nachádza sa najbližšie k miestu zrážky, a teda je vystavený obrovskej radiácii, ktorá ovplyvňuje jeho detekčné schopnosti. Po čase je teda nutné tieto detektory vymeniť. V rámci toho budú použité najmodernejšie technológie v konštrukcii nových detektorov, ktoré by mali presnejšie určovať polohu dopadajúcich častíc. To umožní dôkladnejšie premeranie štandardného modelu, prípadne objavenie nových častíc. Taktiež tieto detektory budú odolnejšie voči radiácii.

Výmena a modernizácia týchto detektorov je časovo náročná a prípadná nefunkčná časť by mohla spôsobiť odstavenie celého systému. Z toho dôvodu je potrebné všetky komponenty pred inštaláciou otestovať. Pracovisko ÚČJF MFF UK v spolupráci s Fyzikálnym ústavom AV ČR má za úlohu otestovať kremíkové detekčné moduly, ktoré budú vyrábané v Českej republike. Pred samotným testom je však nutné pripraviť a nakalibrovať potrebné experimentálne vybavenie.

Práca je delená na šesť hlavných kapitol. Začiatok prvej kapitoly je venovaný princípu polovodičom. V ďalšej časti je stručne popísaný princíp polovodičových detektorov a záver je venovaný princípu zberu dát z týchto detektorov.

Druhá kapitola hovorí o súčasnom experimente ATLAS. Podrobnejšie sa v nej venujeme najmä vnútornému detektoru, ktorý je primárne zložený z polovodičových detektorov. V tejto kapitole je uvedený aj stručný prehľad plánovanej modernizácie ATLASu na ATLAS Upgrade.

Jednotlivé charakteristiky detektorov, ktoré bude potrebné pri testovaní preveriť, sú spolu s vysvetlením uvedené v tretej kapitole.

Vo štvrtej kapitole sa čitateľ dozvie o jednotlivých prístrojoch použitých pri testovaní detektorov laserom. Táto časť slúži najmä tým, ktorí chcú jednotlivé testy prevádzkať. V nej sa dozvedia o konkrétnych postupoch použitých pri meraní.

Piata kapitola je venovaná výsledkom testov jedného modulu, ktorý však nebude použitý v ATLAS Upgrade. Diskusia nameraných výsledkov sa potom nachádza v šiestej kapitole.

1. Polovodičové detektory

Pri štúdiu polovodičových detektorov som čerpal najmä z [1]. Veľký prínos mi prinieslo aj preštudovanie [2, kap. 12].

1.1 Polovodiče

Polovodiče sú pevné látky, ktoré kryštalizujú v mriežke diamantového typu. Každý atóm svojimi štyrmi valenčnými elektrónmi vytvára kovalentnú väzbu so štyrmi najbližšími susedmi. Najpoužívanějšími polovodičmi sú kremík a germanium.

Dôležitou vlastnosťou polovodičov, ktorá ich odlišuje od vodičov a izolantov, je šírka zakázaného pásu. Ide o energiu potrebnú na prechod elektrónu z valenčného do vodivostného pásu. Vo valenčnom páse vznikne tzv. diera, ktorá sa správa ako kladne nabitá častica. Do tejto diery môže preskočiť elektrón z vedľajšej väzby, čím vzniká vodivosť. Šírka zakázaného pásu pri polovodičoch sa pohybuje rádovo okolo $E_g \sim \text{eV}$.

Ďalšou dôležitou charakteristikou polovodičov je ich čistota. Atómy iných prvkov nachádzajúce sa v kryštálových mriežkach môžu výrazne ovplyvniť vlastnosti polovodičov. Nečistoty vytvárajú poruchy v zakázanom páse, na ktorých sa môže zachytiť elektrón, ktorý nemá dostatok energie na to, aby sa dostal do vodivostného pásu. Potrebnú čistotu polovodiča je náročné dosiahnuť. Preto sa nečistoty pridávajú do polovodičov zámerne. Ide o tzv. dopovanie.

1.1.1 Typy polovodičov

V závislosti na typu dopovania môžeme polovodiče rozdeliť na dva typy:

- **Typ n:** Ak do polovodiču pridáme prvok s piatimi valenčnými elektrónmi, donor, na kovalentnej väzbe sa budú podieľať len štyri. Piaty elektrón bude len slabo viazaný a vytvorí si vlastnú energetickú hladinu v blízkosti vodivostného pásu.
- **Typ p:** Pridaním prvku s tromi valenčnými elektrónmi, akceptoru, bude naopak jeden elektrón v kovalentnej väzbe chýbať. Vznikne diera, ktorá si vytvorí vlastnú energetickú hladinu v blízkosti valenčného pásu.

V prípade silného alebo slabého dopovania sa používa označenie + alebo −. Teda polovodič, ktorý je slabo dotovaný prvkom s tromi valenčnými elektrónmi, sa označuje ako polovodič typu p^- .

Pri polovodičoch, nakoľko sú to kryštalické látky, je potrebné uvažovať kmity mriežky. Šírka zakázaného pásu závisí aj od kvázihybnosti elektrónu¹. Podľa toho rozdeľujeme polovodiče na dva typy:

¹Šírka zakázaného pásu sa udáva ako rozdiel najnižšieho bodu vodivostného pásu a najvyššieho bodu valenčného pásu.

- **Priame polovodiče:** O priamom polovodiči hovoríme, ak sa najnižší bod vodivostnej vrstvy nachádza nad najvyšším bodom valenčnej vrstvy. K excitácií v tomto prípade stačí elektrónu energia daná šírkou zakázaného pásu v najužšom bode.
- **Nepriame polovodiče:** V tomto prípade nestačí dodať energiu rovnú šírke zakázaného pásu. K excitácií elektrónu je potrebné dorovnať rozdiel v kvázihybosti emisiou (alebo absorpciou) fonónu.

1.1.2 Vytváranie nositeľov náboja

Nositelia náboja sa v polovodičoch vytvárajú tak, že dodaním energie sa elektrón z valenčného pásu vyzdvihne do vodivostného. Táto energia môže byť dodaná rôznymi spôsobmi.

- **Tepelná excitácia:** U niektorých polovodičov je šírka zakázaného pásu natoľko malá, že tepelné elektróny ($kT \sim 0,026 \text{ eV}$) majú dostatočnú energiu na jeho prekonanie. Zvyšovanie teploty polovodičov teda zvyšuje počet vytvorených nositeľov náboja.
- **Optická excitácia:** V tomto prípade je energia dodaná absorbovaným fotónom predaná elektrónu, ktorý je excitovaný. Tento efekt sa využíva vo fotodiódach a solárnych článkoch.
- **Excitácia nabitými časticami:** Nabité častice pri prechode materiálom strácajú časť svojej energie. Táto energia môže slúžiť na excitáciu elektrónov. Tento efekt sa využíva pri polovodičových detektoroch.

Pri vytvorení nerovnováhy medzi kladnými a zápornými nositeľmi náboja dochádza k ich rekombinácii.

1.1.3 p-n prechod

Jedným zo základných polovodičových štruktúr je p-n prechod. Ide o spojenie polovodiča typu p a n, pri ktorom dochádza k rekombinácii elektrónov a dier v mieste styku. Vytvorí sa oblasť s nenulovým priestorovým nábojom. V oblasti prechodu sa vytvorí vnútorné napätie V_{bi} . Oblasť, v ktorej došlo k rekombinácii sa nazýva vyprázdnená vrstva. Jej šírka závisí od hustoty nositeľov náboja v jednotlivých oblastiach.

Šírka vyprázdnenej vrstvy sa dá ovplyvniť privedením vonkajšieho napätia na p-n prechod v závernom smere².

Typickým prípadom je asymetrické dopovanie v mieste prechodu. Najčastejšie sa používa n^+-p^- prechod. Ide o tenkú n^+ -vrstvu a hrubú p^- -vrstvu. Vyprázdnená vrstva je potom taktiež asymetrická. Jej šírka je pri napätí vyprázdnenia V daná vzťahom (podľa [1])

$$d \cong \sqrt{\frac{2\varepsilon V}{qN}}, \quad (1.1)$$

kde N označuje počet atómov prímiesi³.

²Zapojenie kladného pólu zdroja k typu n a záporného pólu k typu p .

³Taktiež počet nositeľov náboja v oboch polovodičoch

1.2 Polovodiče ako detektory

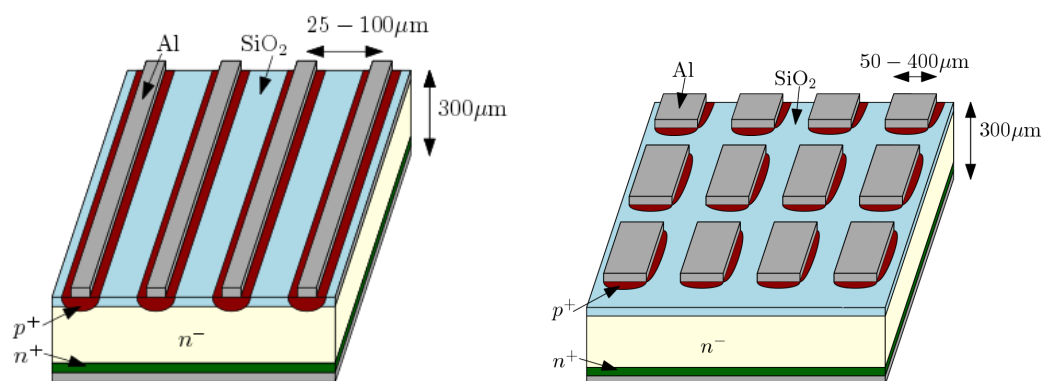
Polovodiče sa ako detektory používajú pre viaceré výhody. Malá šírka zakázaného pásu znamená vysoký počet vytvorených elektrón-dierových párov pri danej predanej energii. Vysoká hustota zas vedie k veľkým ionizačným stratám, a teda stačí vyrábať tenké detektory. Pomocou dotovania je navyše možné prispôbiť konfiguráciu polovodiču pre konkrétny typ experimentu.

1.2.1 Princíp

Aktívnou oblasťou polovodičových detektorov je oblasť bez voľných nositeľov náboja. V prípade p-n prechodu ide o vyprázdnenú oblasť.

Ako je popísané vyššie, nabité častice prechádzajúce aktívnou oblasťou detektoru vytvárajú voľné nositele náboja. Zozbieraním vzniknutého náboja dostávame informáciu o dopadajúcej častici.

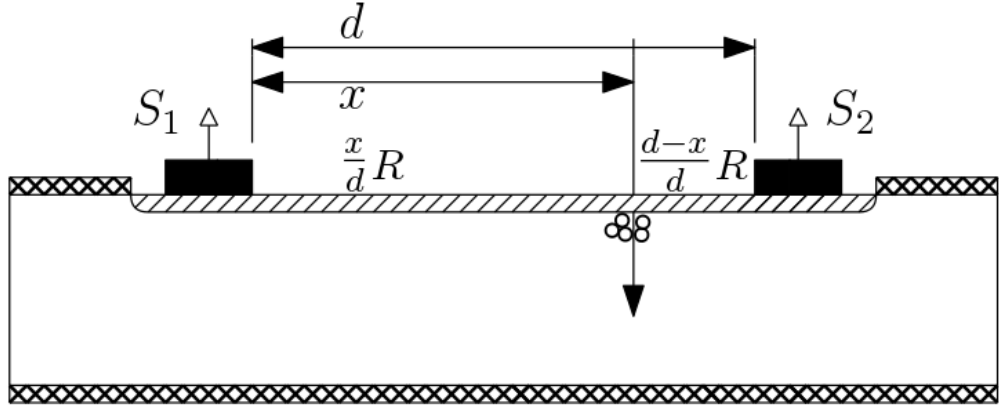
Na určenie polohy častice je potrebné segmentovať elektródu na stripy alebo pixely. Schéma stripového a pixelového detektoru s približnými rozmermi a najčastejšie používanými materiálmi je znázornená na obr. 1.1. Podľa toho, kde častica preletela, sa vzniknutý náboj prerozdelení medzi najbližšie elektródy.



Obr. 1.1: Schéma stripového (vľavo) a pixelového (vpravo) detektora. Na obrázku sú znázornené aj najčastejšie používané materiály a orientačné rozmery daných detektorov.

1.2.2 Odporové delenie náboja

Na presné určenie polohy dopadajúcej častice sa využíva tzv. odporové delenie náboja. Medzi elektródy sa nanesie odporová vrstva. Vzniknuté elektróny, ktoré doputujú na túto hornú vrstvu, sa prerozdelia medzi najbližšie elektródy v pomere odpovedajúcom odporom (vzdialenostiam) daných elektród. Schéma odporového delenia je znázornená na obr. 1.2.



Obr. 1.2: Princíp odporového delenia náboja. Nanesením odporovej vrstvy medzi elektródy sa vzniknutý náboj prerozdelení v pomere vzdialeností od jednotlivých stripov. Takto je možné určiť miesto prechodu častice.

1.2.3 Vyčítanie signálu z elektród

Na vyčítanie signálu z jednotlivých elektród sa využívajú dve metódy.

Binárne vyčítavanie

Ide o najjednoduchší spôsob vyčítania, kedy je predávaná iba logická informácia ANO/NIE, ktorá odpovedá tomu, či signál na danej elektróde prekročil nastavený prah.

Pokiaľ určujeme polohu častice podľa elektródy s najvyšším signálom, je presnosť daná vzťahom (podľa [1])

$$\sigma_x = \frac{p}{\sqrt{12}}. \quad (1.2)$$

V prípade, že určujeme polohu častice podľa viacerých elektród (na ktorých signál prekročil nastavený prah) je presnosť určenia polohy asi o 30% lepšia.

Analógové vyčítavanie

Zaznamenáva sa presná informácia o signále z každej elektródy. Výsledná poloha je určená ťažiskom signálu. V tomto prípade navyše získame informáciu o celkovej predanej energii.

Presnosť je daná vzťahom (podľa [1])

$$\sigma_x = \frac{ap}{S/N}, \quad (1.3)$$

kde a je parameter, ktorý závisí na modeli šumu systému a počte zasiahnutých stripov⁴ a S/N je pomer signálu a šumu.

Použitím tejto metódy sa pri malej rozteči p dá dosiahnuť presnosť až $2 \mu\text{m}$.

⁴Pre 3 stripy je $a \approx 2$.

1.2.4 Šum

Výrazný vplyv na presnosť merania má aj šum systému. Ten je spôsobený najmä nežiadúcimi procesmi, ktoré vedú k vytváraniu nositeľov náboja (tepelná a optická excitácia). Tieto procesy sa dajú potlačiť chladením a zamedzením prístupu žiarenia.

Ďalšou zložkou šumu je objemový šum v detektore. Ten je spôsobený fluktuáciami spätného prúdu I_d detektorom. Pre tento spätný prúd platí (podľa [1])

$$I_d \sim \sqrt{V}. \quad (1.4)$$

Dôležitou zložkou šumu je šum na odporoch a ostatných elektronických súčiastkach.

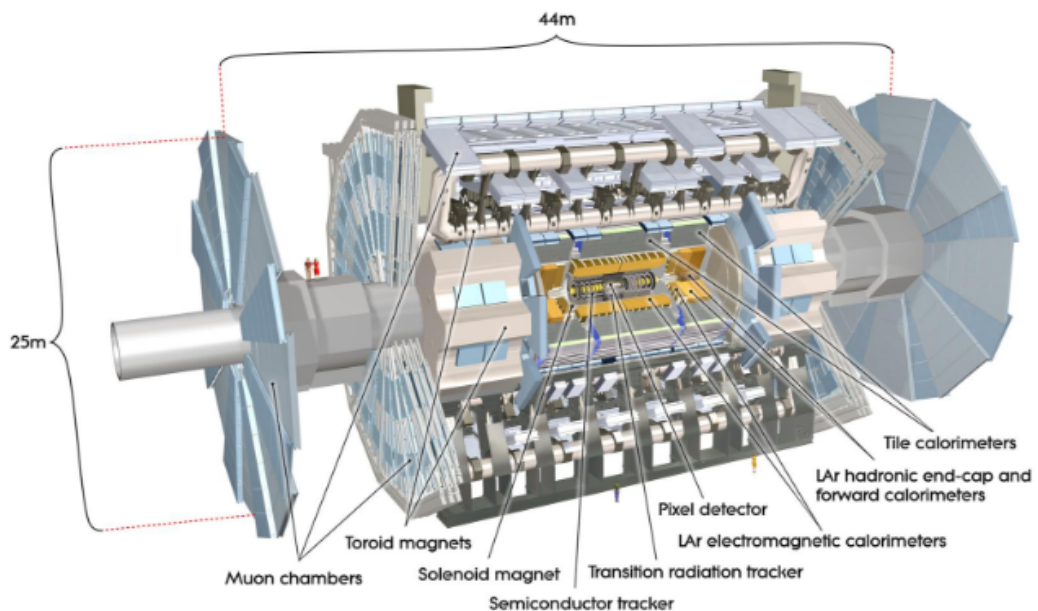
2. ATLAS upgrade

2.1 Experiment ATLAS

V tejto kapitole sa podrobnejšie pozrieme na experiment ATLAS. Ide o systém detektorov, ktorý môžeme rozdeliť na tri základné časti [3]:

- Vnútorý detektor
- Kalorimetre (hadrónový a elektromagnetický)
- Miónové komory

Schéma celého ATLASu s popisom jednotlivých častí a rozmermi je znázornená na obr. 2.1. Ďalej sa budeme podrobnejšie zaoberať iba vnútorným detektorom.



Obr. 2.1: Schéma experimentu ATLAS [3]

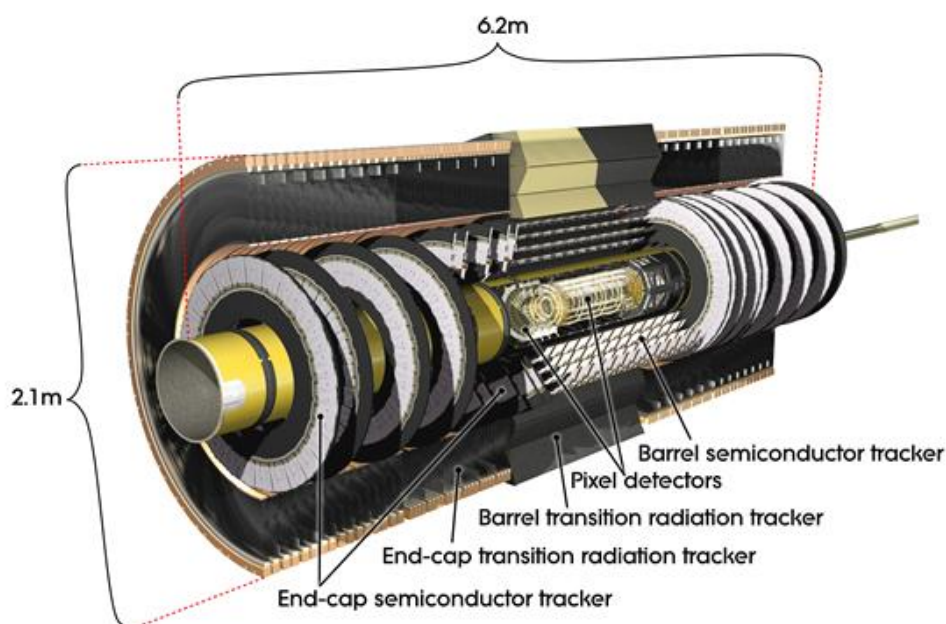
2.1.1 Vnútorý dráhový detektor

Vnútorý dráhový detektor experimentu ATLAS, Inner Detector (ID), je časť detektoru nachádzajúca sa najbližšie k miestu zrážky. Ako prvý sleduje produkty vzniknuté pri zrážke v LHC. Je preto potrebná jeho vysoká citlivosť a kompaktné rozmery, aby sme sa mohli dostať čo najbližšie k miestu zrážky. V týchto miestach je potrebná taktiež vysoká radiačná odolnosť. Tieto požiadavky splňujú polovodičové detektory.

Vnútorý dráhový detektor slúži na určenie vertexu¹, hybnosti a náboja elektricky nabitých častíc, ktoré vznikli zo zrážky. Schéma vnútorného dráhového detektoru je znázornená na obr. 2.2. Je zložený z troch hlavných častí [4]:

¹miesto zrážky

- **Kremíkový pixelový detektor²:** je zložený z troch valcových častí s polomeri 5,5 cm, 9,5 cm a 12,5 cm a troch diskov na každej strane, tzv. endcap, medzi polomeri 9 cm a 15 cm. Dohromady sa na všetkých vrstvách nachádza 1 744 modulov, pričom na každom z nich je 46 080 pixelov.
- **Kremíkový stripový detektor³:** je zložený zo štyroch valcových častí s polomeri 30 cm, 37,3 cm, 44,7 cm a 52 cm, na ktorých je celkovo 2 112 modulov a deviatich endcap častí na každej strane medzi polomeri 25,9 cm a 56 cm, na ktorých je celkovo 1 976 modulov. Všetky moduly sú dvojvrstvové a obsahujú po 80 stripov s roztečou 80 μm .
- **Detektor prechodového žiarenia⁴:** je jediná časť vnútorného detektora, ktorá neobsahuje polovodičové detektory. Ide o systém rúrok s priemerom 4 mm, pričom každá obsahuje mnoho drôtov, čím sa vytvorí mnoho prechodov medzi prostrediami. Na nich sa pri prechode častice vytvára prechodové žiarenie, ktoré detegujeme fotodetektormi.



Obr. 2.2: Schéma vnútorného detektora [4]

2.1.2 Magnetický systém

Vnútorný detektor ATLASu sa nachádza v magnetickom poli s intenzitou $B = 2\text{ T}$ [5], ktoré zakrivuje dráhu prelietavajúcich častíc. Z polomeru zakrivenia častice sa dá určiť hybnosť. Pre transverzálnu hybnosť častice s nábojom $|q| = 1e$ v magnetickom poli o intenzite B platí vzťah (podľa [1])

$$p_t[\text{GeV}/c] = 0,3B[\text{T}]\rho[\text{m}], \quad (2.1)$$

kde ρ je polomer zakrivenia.

²Pixel Detectors

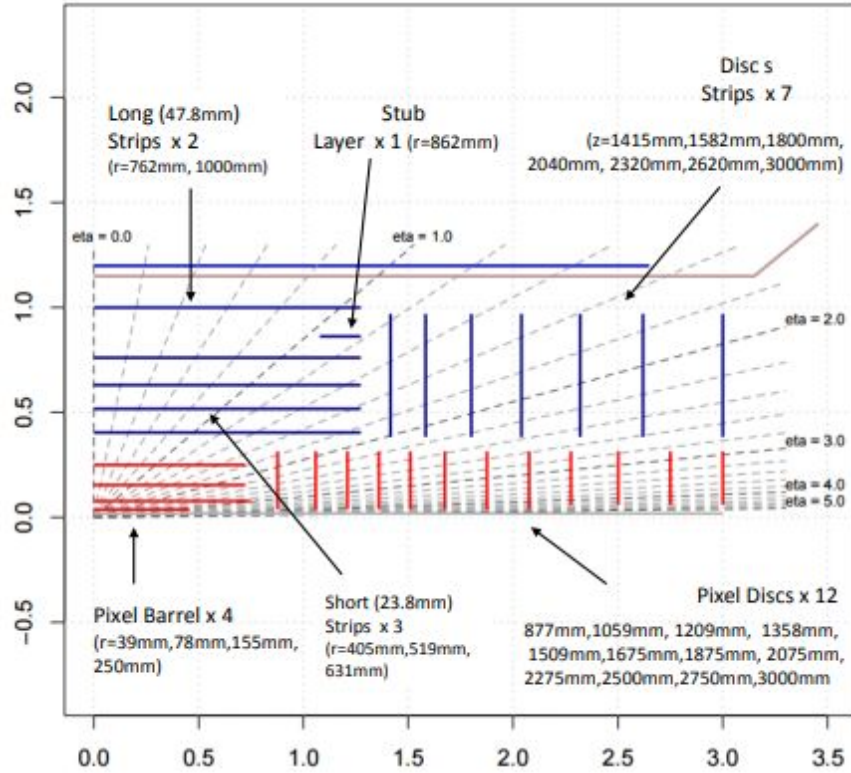
³Semiconductor Tracker (SCT)

⁴Transition Radiation Tracker

2.2 ATLAS upgrade

V rámci plánovanej modernizácie celého LHC na High Luminosity LHC je potrebné vymeniť a modernizovať aj ostatné experimenty. Jedným z nich je aj experiment ATLAS, pri ktorom sa budeme bližšie venovať modernizácii vnútorného detektoru.

Vnútorný detektor bude vymenený za vnútorný dráhový detektor, Inner Tracker (ITk), ktorý bude pozostávať z pixelových a stripových kremíkových detektorov usporiadaných do valcových a endcapových vrstiev. Schéma ITk je znázornená na obr. 2.3 ⁵.



Obr. 2.3: Podrobná schéma nového vnútorného detektoru [7]

Každá vrstva je zložená zo segmentov⁶, ktorých tvar je odlišný pre valcové a endcapové časti. V prípade valcových častí majú segmenty obdĺžnikový tvar rozdelený na jednotlivé hybridy. Na konci každého segmentu je vyčítacia elektronika.

Endcapové segmenty majú lichobežníkový tvar. Rovnako ako valcové segmenty, aj tieto sú zložené z hybridov a zakončené vyčítacou elektronikou.

⁵Symbol $\eta \equiv \text{eta}$ na obrázku označuje tzv. pseudorapiditu danú vzťahom (podľa [6])

$$\eta = -\ln \left[\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right],$$

kde θ je uhol medzi kladným smerom zväzku a trojhybnosti \vec{p} . Ide teda o relatívny uhol od kladného smeru zväzku využívaný v experimentálnej fyzike.

⁶Originálny názov je stave

3. Metódy testovania detektorov

Ako bolo spomenuté vyššie, pred montážou nových detektorov je potrebné previesť sériu testov na zistenie ich funkčnosti. Jedným z testov je testovanie odozvy detektora pri rôznych podmienkach za použitia rozličných zdrojov žiarenia. Ako zdroj sa dá použiť β žiarič alebo laser. Pre základné testy je výhodné použiť laser pre jeho ľahké nastavenie triggru¹ a možnosti veľmi presného zaostrenia na konkrétny strip. Testy so zdrojom β žiarenia sú výhodné kvôli podobnosti s reálnym využitím v ATLASe.

V ďalšej časti sú uvedené rôzne charakteristiky modulov, ktoré sa pri testovaní prevádzajú. Všetky tieto scany boli prevedené aj na testovanom module a výsledky testovania sú uvedené v kapitole 5.

3.1 Threshold scan

Výsledkom threshold scanu je závislosť veľkosti vyčítaného signálu na thresholde. Z výsledných grafov sa dá určiť úroveň šumu systému. Pre ďalšie meranie je potom potrebné, aby dopadajúci laserový zväzok generoval podstatne vyšší signál oproti šumu.

Dôležitým výstupom tohto scanu pre každý strip je bod, kde odozva dosahuje 50% z maximálnej hodnoty. Tento bod sa nazýva vt50.

Threshold scan sa používa aj pri určovaní signálu pri dopadajúcom žiarení. Vo výsledku by mal byť viditeľný vysoký signál z jedného stripu.² Z výsledného grafu sa dá určiť pomer signálu a šumu³.

3.2 Strobe delay scan

Väčšina charakteristík modulu vyžaduje vnútorný kalibračný pulz. Ide o pulz so známou hodnotou náboja, injektovaný do vyčítacej elektroniky modulu. Pred jeho použitím je však potrebné nastaviť správne načasovanie medzi injektovaním pulzu a jeho vyčítaním.

Strobe delay scan určí najlepšie načasovanie injektovania pulzu, ktoré je potom potrebné nastaviť v konfiguračnom súbore. Ten sa načítava pri spustení ostatných scanov, ktoré využívajú kalibračný pulz.

3.3 Response curve

Pri testovaní modulov je dôležité poznať prepočet hodnoty vyčítaného pulzu z mV na fC. Injektovaním kalibračného pulzu so známou hodnotou náboja vieme určiť odozvu detektora v mV. Pokiaľ tento proces zopakujeme pre viac hodnôt náboja kalibračného pulzu vieme výsledné body nafitovať, čím dostávame response

¹Trigger je funkcia vyčítacieho čipu, ktorá určuje, kedy je potrebné vyčítať signál z detektora.

²To závisí od šírky dopadajúceho zväzku a od jeho polohy. Preto je možné pozorovať aj signál z dvoch susedných stripov.

³Tento pomer sa využíva na výpočet chýb polohy dopadajúceho zväzku. Viď napr. (1.3)

curve. Dostatočnú presnosť dosiahneme pre približne desať rôznych hodnôt kalibračného pulzu.

3.4 Three point gain (3PG)

Response curve sa pre malé hodnoty náboja dá s veľkou presnosťou aproximovať lineárnou funkciou. Veľmi často je táto lineárna funkcia postačujúca pre ďalšie meranie. Tento scan vykoná tri merania s rôznymi hodnotami kalibračného pulzu, ktoré potom nafituje lineárnou funkciou.

Výhodou tejto charakteristiky je, že v oblasti malého signálu je 3PG takmer totožná s response curve, no čas scanovania je podstatne kratší.

3.5 Noise occupancy scan

Ako napovedá názov, tento scan slúži na určenie počtu šumom obsadených kanálov v závislosti na thresholde. Postupným zvyšovaním thresholdu sa počet šumom obsadených kanálov znižuje. Z výsledného grafu sa dá určiť vhodný threshold, pri ktorom je dostatok šumom neobsadených kanálov.

3.6 Repeating burst

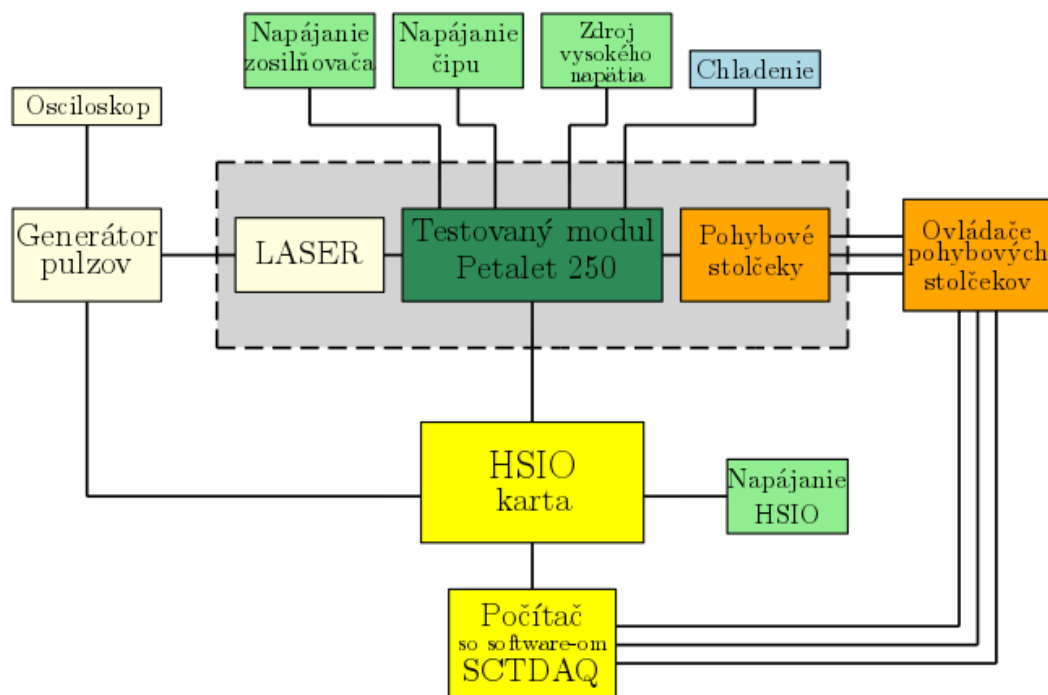
V tomto prípade nejde o žiadnu charakteristiku modulu. Ide o opakujúce vyčítanie detektoru pre fixne zadaný threshold. Da sa využívať pri ladení laseru do optimálnej zaostrenej polohy. Výhodou je, že vidíme signál z detektora v reálnom čase.⁴

⁴Zobrazený signál je v skutočnosti oneskorený o dobu potrebnú na zber a spracovanie signálu. Táto doba sa však skrátit nedá a jej trvanie je zanedbateľne malé.

4. Popis experimentálneho zariadenia

Experimentálna časť prebiehala v laboratóriách Ústavu jadrovej a časticovej fyziky. Konkrétne v tzv. Čistá miestnosť 1 (CR1) a Elektronická miestnosť (ER).

Testovanie modulov laserom prebiehalo v CR1. Pre potreby tejto práce bol testovaný modul Petalet 250. Vyčítacia elektronika detektoru bola na počítač napojená cez kartu HSIO, ktorá slúži aj ako trigger pre signál z laseru. Na spracovanie a vizualizáciu dát slúži software SCTDAQ nainštalovaný na lokálnom PC. Podrobne je schéma celého experimentu zakreslená na obrázku 4.1



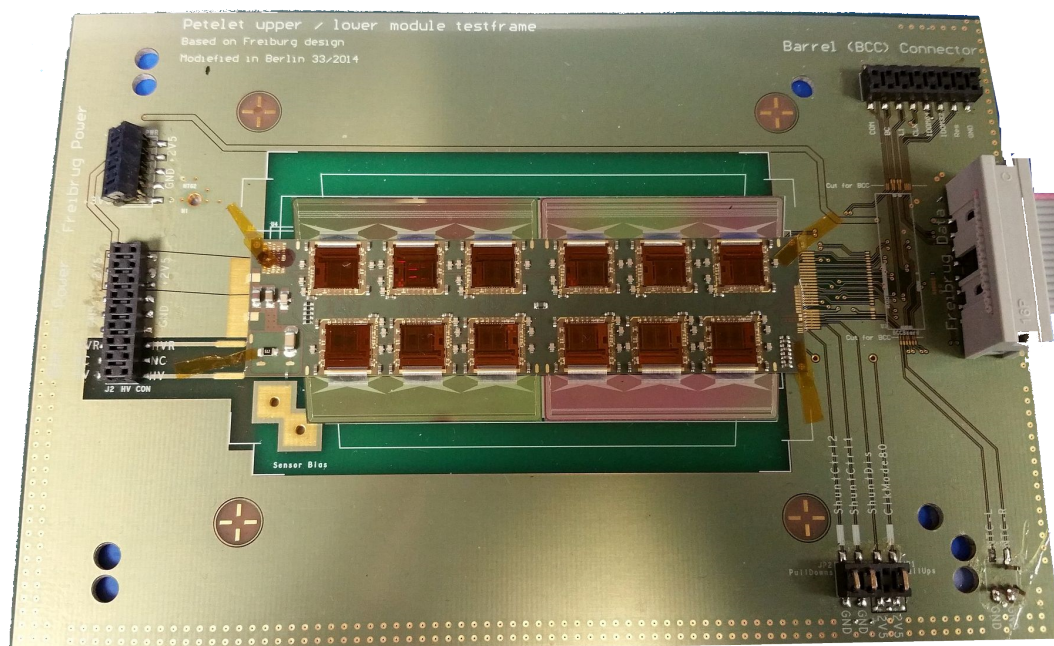
Obr. 4.1: Schéma zapojenia prístrojov použitých na testovanie detektorov laserom.

4.1 Testovaný modul

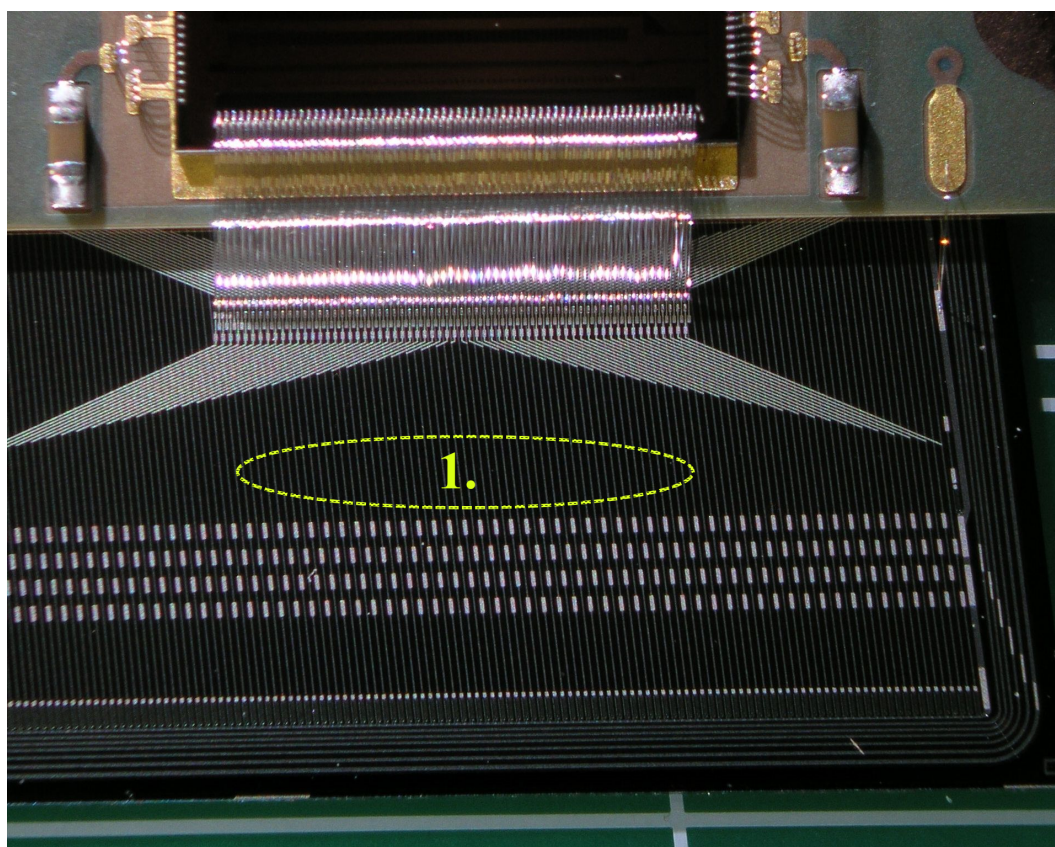
Ako bolo spomenuté vyššie, modul použitý na testovanie sa nazýva Petalet 250 (viď obr. 4.2). Ide o kremíkový stripový detektor s roztečou $p = 100 \mu\text{m}$. Tento modul obsahuje 2 rady vyčítacích čipov z každej strany modulu, pričom pri testovaní boli napojené vrchné dva rady. Na obr. 4.3 je znázornený detail testovaného modulu so zvýraznenou oblasťou, na ktorú pri testovaní dopadal laserový zväzok.

Na obr. 4.2 je vidieť, že je modul napojený na testovací rám určený konkrétne na testovanie modulov Petalet.

Tento modul sa používa ako jedna z častí endcapového segmentu, čo je vidieť z jeho lichobežníkového tvaru. Nejde však o modul, ktorý bude použitý pre ATLAS Upgrade, pretože tam sa počíta s použitím modulu Petalet 130. Pre potreby práce však bol tento modul postačujúci.



Obr. 4.2: Testovaný modul Petelet 250 vsadený do testovacieho rámu.

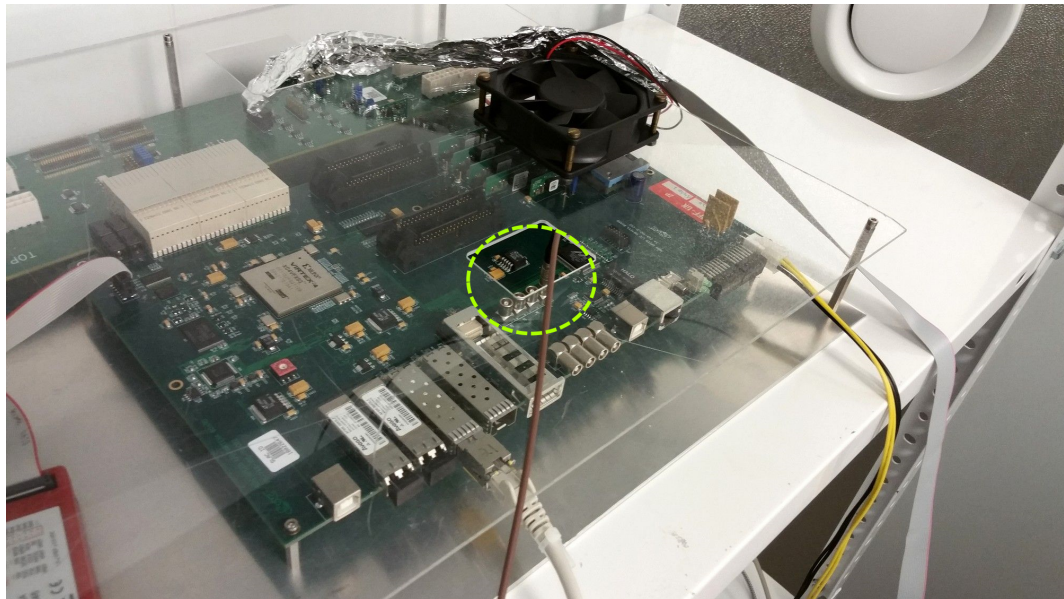


Obr. 4.3: Detail testovaného modulu Petelet 250. Číslom 1. je znázornená oblasť, na ktorú pri testovaní dopadal laserový zväzok.

4.2 Vyčítanie a spracovanie signálu

Prepojenie medzi modulom a počítačom zaisťuje karta HSIO. Ide o starší model, ktorý bol pôvodne vyvinutý pre SLAC, no pre jeho širokú variabilitu je možné ho použiť aj v rámci testovania modulov ITk.

HSIO karta je znázornená na obr. 4.4. Na tomto obrázku je zvýraznený LEMO konektor, ktorého druhý koniec je zapojený do generátora pulzu pre laser. Týmto zapojením docielime, aby HSIO posielala signál do generátora pulzu, ktorý potom pošle pulz do laseru.



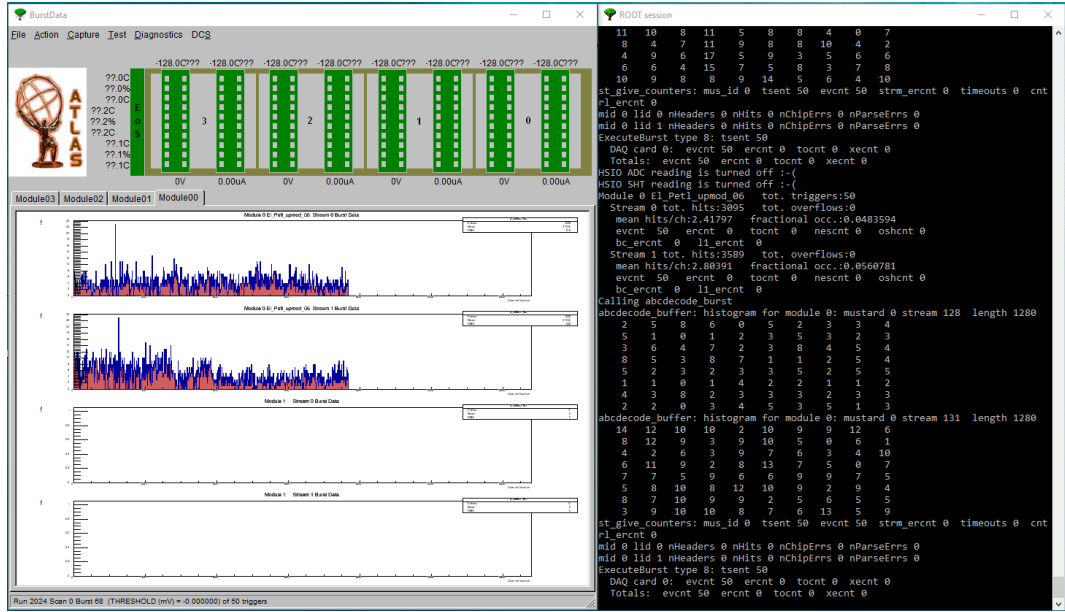
Obr. 4.4: HSIO karta zabezpečujúca rozhranie medzi vyčítacou elektronikou detektora a počítačom pomocou LAN káblu. Na tomto obrázku je zvýraznený, ktorým LEMO konektorom je HSIO pripojený ku generátoru pulzu.

Spracovanie signálu prebieha v PC za pomoci SCTDAQ software-u, verzie 2377. Ide o systém makier pracujúcich pod programovým balíkom ROOT¹, ktoré spracovávajú výstupné dáta, vykresľujú grafy a ukladajú namerané údaje.

Pracovné prostredie SCTDAQ je zobrazené na obr. 4.5. Jeho hlavnou časťou je grafické okno, kde prebieha väčšina nastavovaní. V tomto okne sa po spustení scanu zobrazuje aktuálny signál z detektoru. K dispozícii je ďalšie grafické okno (nie je zobrazené na obr. 4.5), v ktorom sa po prevedení scanu zobrazuje histogram nameraných hodnôt.

Dôležitou súčasťou je aj príkazové okno, kde sa zobrazujú podrobné údaje o prebiehajúcom scane. Z tohto okna je možné spúšťať rôzne vlastné makrá.

¹ROOT je software využívajúci syntax C++, ktorý obsahuje objekty na vytváranie grafov, histogramov a ďalších vecí potrebných pre spracovanie dát [8].



Obr. 4.5: Pracovné prostredie SCTDAQ. Vľavo je znázornené grafické okno, v ktorom sa spúšťajú základné scany. Vpravo je znázornené príkazové okno, v ktorom sa zobrazujú výsledky. Rôznymi príkazmi je možné ovládanie aj iba pomocou tohto okna.

4.3 Chladenie

Veľmi dôležitou súčasťou merania je chladenie modulu. Modul je položený na kovovej podložke, ktorá je externe chladená prístrojom *Julabo CF31* na teplotu 10°C . Pre laser testy je táto teplota postačujúca, pretože pomer signálu a šumu je vysoký.

Po zapnutí chladenia je potrebné počkať minimálne 15 minút, aby sa teplota modulu ustálila. Pokiaľ by sme na detektor priviedli potrebné napätie vyprázdnenia V pri izbovej teplote, tepelne generované elektróny by spôsobovali vysoký výstupný prúd a teda vysoký šum.

4.4 Laser

Pri testovaní bol použitý infračervený laser s vlnovou dĺžkou 1060 nm . Tvar laserového pulzu je kontrolovaný generátorom pulzu od firmy Agilent. Parametre generovaného pulzu sú zapísané v tabuľke 4.1.

Tabuľka 4.1: Parametre generovaného pulzu

Pulse delay:	$4,80\ \mu\text{s}$	High voltage:	$3,35\ \text{V}$
Pulse width:	$2,39\ \text{ns}$	Low voltage:	$-11,2\ \text{mV}$

4.4.1 Pohyb lasera

Pohyb lasera zabezpečujú pohybové motorčeky od firmy STANDA. Ide o sústavu troch polohovacích stolčekov (viď obr. 4.6) napojených kolmo na seba tak,

aby každý z nich zaobstarával pohyb v smere jednej osi. Ich pohyb zaobstarávajú ovládače, taktiež od firmy STANDA (viď obr. 4.7), pomocou ktorých je možné aj manuálne ovládanie. Minimálna dĺžka jedného kroku je $l = 0,2 \mu\text{m}$ [9]. Ich presnosť je podľa výrobcu $\sigma = 0,023 \mu\text{m}$ [9].



Obr. 4.6: Polohovací stolček STANDA 8MT167-100DCE2 [9] Obr. 4.7: Ovládač polohovacieho stolčeku STANDA 8SMC5 [9]

Ovládanie je možné taktiež pomocou originálneho software-u XILab dodávaného výrobcom.² Pre praktické účely je ovládanie možné aj pomocou makra. K tomu je potrebné prepísať súbor³

```
e:/CleanRoom1/execs/ExecStandaCommand.bat
```

podľa tejto predlohy

```
e:/CleanRoom1/execs/TStanda22015.exe [číslo osi]
e:/CleanRoom1/cfg/StandaConsistenceList.cfg [vzdialenosť] 4;
```

pričom *číslo osi* je dané v tabuľke 4.2. Smer pohybu je daný znamienkom pred číslom *vzdialenosť*, taktiež podľa tabuľky 4.2. Po nastavení a uložení týchto hodnôt stačí kliknutím spustiť daný súbor, poprípade spustiť odkaz *Standa moving* na pracovnej ploche.

Tabuľka 4.2: Základné parametre polohovacích stolčekov

<i>os</i>	<i>číslo osi</i>	<i>kladný smer</i>	<i>ID ovládača</i>	<i>USB port</i>
x	1	vľavo	649	COM 4
y	2	dozadu	3216	COM 5
z	3	hore	3151	COM 6

4.4.2 Zaoštrenie lasera

Pred použitím lasera ako zdroja žiarenia je potrebné zaostriť na povrch detektoru. K tomu poslúži skutočnosť, že stripy sú vyrobené z hliníku, a teda laser sa od nich odráža.

²Spustiť sa dá v CR1 kliknutím na ikonu na pracovnej ploche. Po kliknutí sa otvorí okno, v ktorom je potrebné skontrolovať, či ID ovládačov súhlasia s číslom USB portu (správne nastavenie viď tabuľka 4.2).

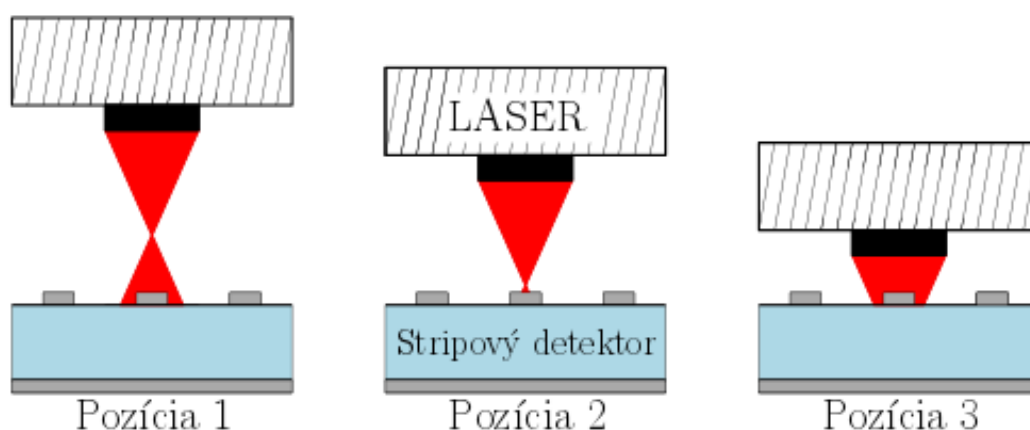
³POZOR! Je to spustiteľný súbor.

Na zaostrenie laseru sa používa *repeating burst*. Trigger je potrebné nastaviť na *L1A*. Pri tomto nastavení vyčítací čip vysiela signál do generátora laserového pulzu, a teda presne vie, kedy má vyčítať signál z detektora. Pre väčšiu prehľadnosť je potrebné nastaviť aj threshold tesne nad úroveň šumu.

V prvom kroku je potrebné nájsť stred stripu. Ten sa nachádza v strede medzi polohami, kde vyčítavame rovnaký signál z dvoch stripov. Jemným pohybom laseru po ose y tieto dve polohy nájdeme.

V strede stripu očakávame nulový signál z laseru. To je splnené iba za predpokladu, že šírka laserového zväzku v mieste dopadu je menšia ako šírka stripu. Pokiaľ je šírka laserového zväzku väčšia ako šírka stripu, budeme z daného stripu dostávať signál (viď obr. 4.8). Jemným pohybom po ose z nájdeme hraničné body (na obr. 4.8 ako *Pozícia 1* a *Pozícia 3*). V strede, medzi týmito bodmi, sa nachádza bod, v ktorom je laser zaostrený na povrch detektoru.

Zopakovaním celého procesu sa uistíme, že laser je zaostrený správne, poprípade doladíme jemné nepresnosti.



Obr. 4.8: Polohy pre zaostrenie lasera. Pokiaľ je šírka laserového zväzku väčšia ako šírka stripu, môžeme z daného stripu vyčítavať signál.

4.5 Napájanie

Pre správnu funkčnosť modulu a vyčítavacieho čipu je potrebné správne napájacie napätie. Pred každým spustením tohto napájania je potrebné skontrolovať nastavené hodnoty, pretože by sme mohli nenávratne poškodiť jemnú elektroniku čipov.

Modul je napájaný dvomi zdrojmi nízkeho napätia. Ide o zdroje značky TTI CPX400SP. Jeden z nich napája priamo elektroniku čipu a druhý napája zesilovač výstupného signálu. Po spustení je potrebné skontrolovať meraný prúd. Jednotlivé hodnoty napätia a prúdu sú zapísané v tabuľke 4.3.

Na modul je privedené aj vysoké napätie slúžiace ako napätie vyprázdnenia. Zdrojom tohto napätia je prístroj Keithley 2410. Toto napätie je potrebné privádzať postupne⁴, pričom je nutné dbať na to, aby prúd neprekročil stanovenú hodnotu. Tieto hodnoty sú taktiež zapísané v tabuľke 4.3.

⁴Až po vychladení modulu.

Karta HSIO je napájaná zdrojom Agilent E3646A. Potrebné napájacie napätie je zapísané v tabuľke 4.3.

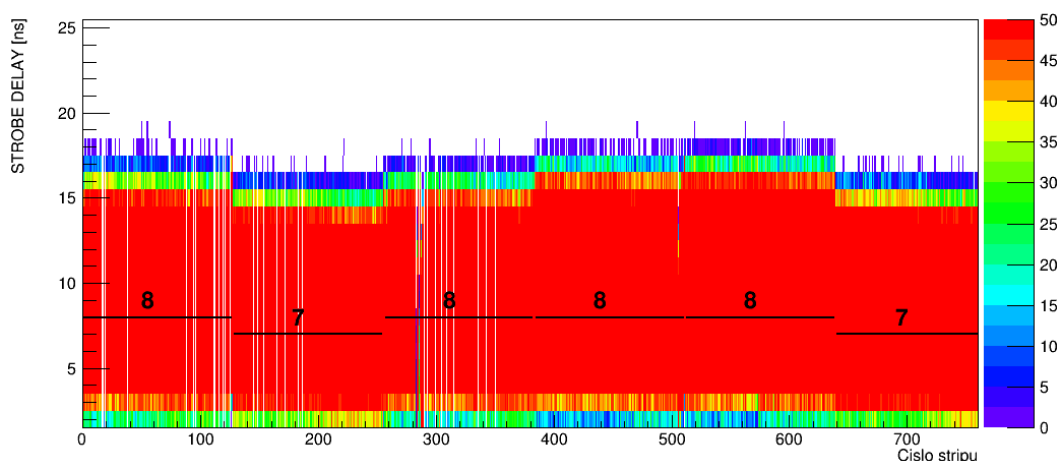
Tabuľka 4.3: Hodnoty napájacieho napätia

	U [V]	I	<i>poznámka</i>
Napájanie čipu	2,73	max. 2,1 A	pred prvým zapnutím SCTDAQ môže byť o niečo vyšší
Napájanie zosilňovača	4,50	0,32 A	-
Napätie vyprázdnenia	-200	max. 70 μ A	napätie treba zvyšovať po cca 10 V
Napájanie HSIO	48	\sim 0,4 A	po zapnutí treba počkať, kým sa načíta

5. Výsledky merania

5.1 Prevod mV na fC

Pred prevedením ostatných charakteristík je potrebné previesť strobe delay scan. Výsledok tohto scanu je grafický zobrazený na obr. 5.1. Pre každý čip je určené najlepšie oneskorenie, ktoré je taktiež zobrazené na obr. 5.1



Obr. 5.1: Strobe delay scan s vyhodnotenými hodnotami najlepšieho oneskorenia. Tie sa po tomto scanu nastavujú v konfiguračnom súbore.

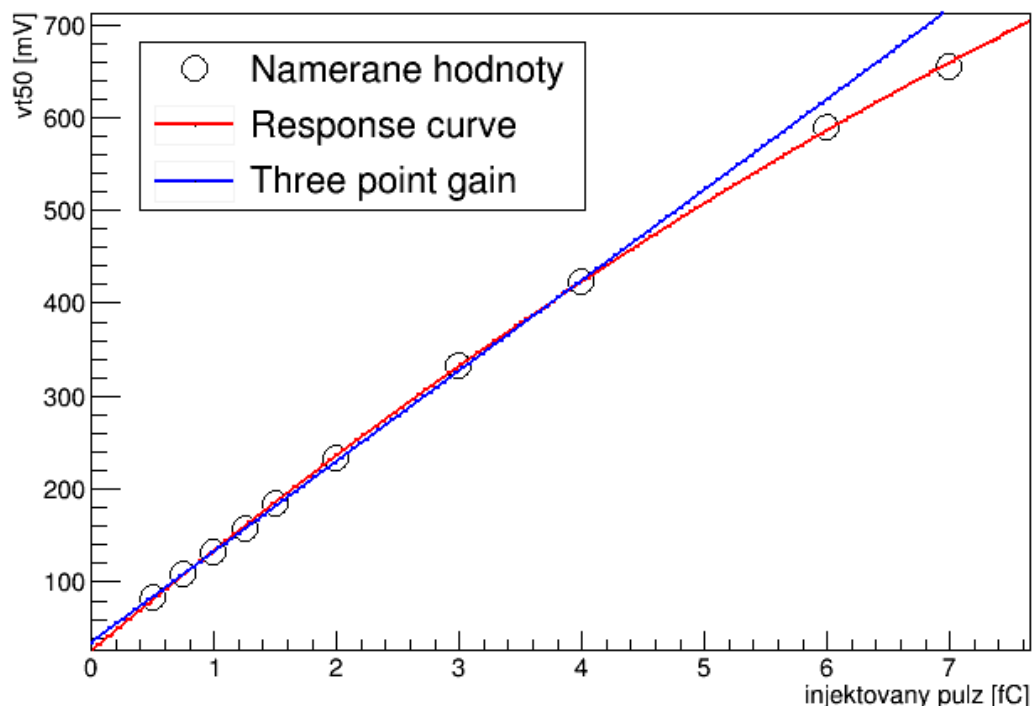
Po nastavení tohto oneskorenia do konfiguračného súboru bolo možné zmerať response curve. Tá bola premeraná pre 10 rôznych hodnôt kalibračného pulzu. Výsledné body sú nafitované kvadratickou funkciou, ktorej parametre sú zapísané v tabuľke 5.1. Graficky sú namerané hodnoty spolu s nafitovanou funkciou zakreslené na obr. 5.2.

Pre hodnoty kalibračného pulzu 0,75 fC, 1 fC a 1,25 fC boli namerané hodnoty nafitované priamkou 3PG. Výsledky fitu sú zapísané v tabuľke 5.1. Výsledná priamka je zakreslená na obr. 5.2.

Tabuľka 5.1: Výsledky fitu pri prepočte mV na fC

	<i>predpis</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Response Curve	$y = ax^2 + bx + c$	$-2,9 \pm 0,3$	111 ± 2	25 ± 3
Three point gain	$y = ax + b$	$97,3 \pm 0,2$	$34,5 \pm 0,2$	-

Nakoľko v ďalšom meraní odozva neprekročila hodnotu $vt50 \sim 500 \mu\text{m}$, bol pre ďalšie merania použitý lineárny prepočet.



Obr. 5.2: Response curve a three point gain. Po injektovaní pulzu o danej hodnote náboja meriame odozvu detektora v mV. Three point gain je zjednodušenie merania odozvy na lineárnu oblasť.

5.2 Šum detektoru

V nasledujúcom kroku bol vyhodnotený šum detektoru. Pre porovnanie bol šum vyhodnocovaný pred a po zapnutí napätia vyprázdnenia.

Ako prvé bol prevedený noise occupancy scan. Výsledok scanu je znázornený na obr. 5.3. Na oboch grafoch je pre lepšiu názornosť nastavený rovnaký rozsah oboch osí.

Pre určenie výšky šumu bol prevedený threshold scan. Výsledok je znázornený na obr. 5.4.

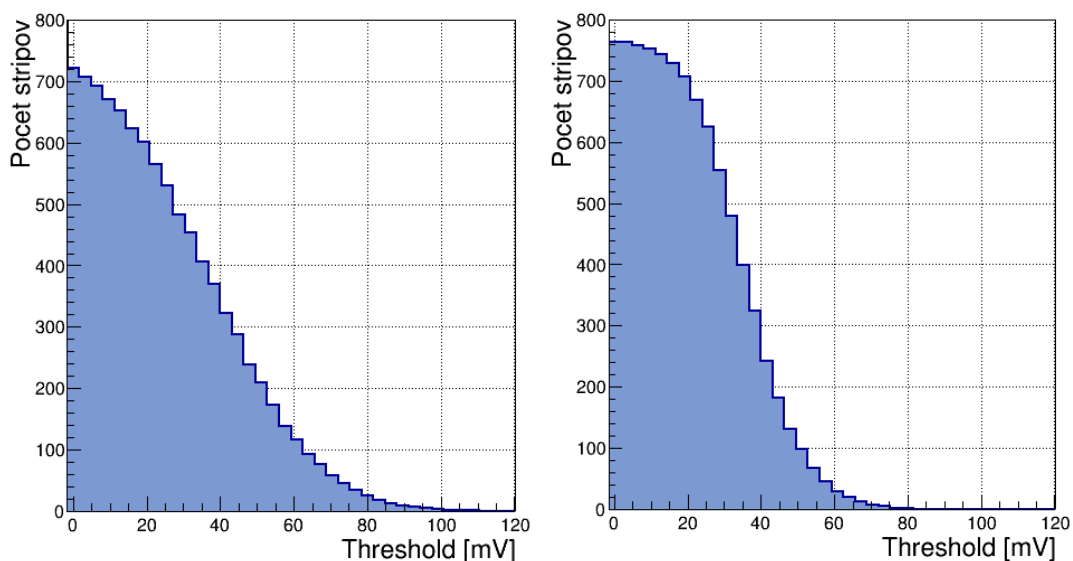
5.3 Vlastné meranie

V rámci testovania bola premeraná závislosť vt_{50} na polohe lasera. Z výsledku tohto scanu je možné podrobne porovnať odozvu jednotlivých stripov.

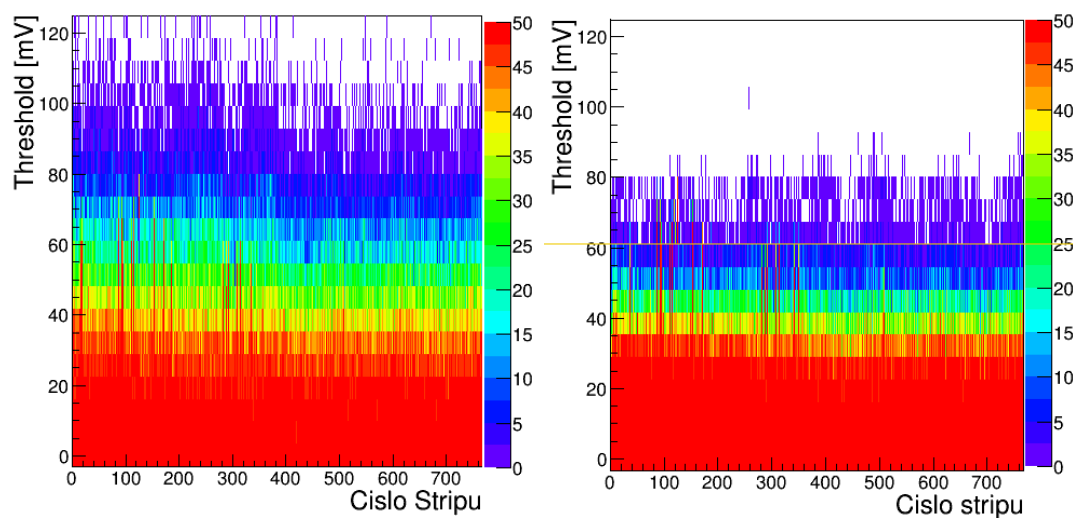
Pre účely tohto merania je určené makro pracujúce v prostredí ROOT (viď príloha 1). Toto makro automaticky ovláda pohyb lasera, pričom po posunutí o nastavený krok je spustený threshold scan. Po prejdení nastaveného počtu krokov sa laser vráti na pôvodné miesto. Výsledné threshold scany sú na záver spracované pomocou ďalšieho makra.

Meranie prebiehalo najskôr s veľkým krokom $10\ \mu\text{m}$ na zistenie odozvy jednotlivých stripov. Odozva stripov sa v niektorých meraniach líšila. Takéto meranie je znázornené na obr. 5.5. Pre stripy, ktorých odozva je nižšia ako očakávame, neplatí prepočet mV na fC, a preto v tomto grafe je odozva uvedená iba v mV.

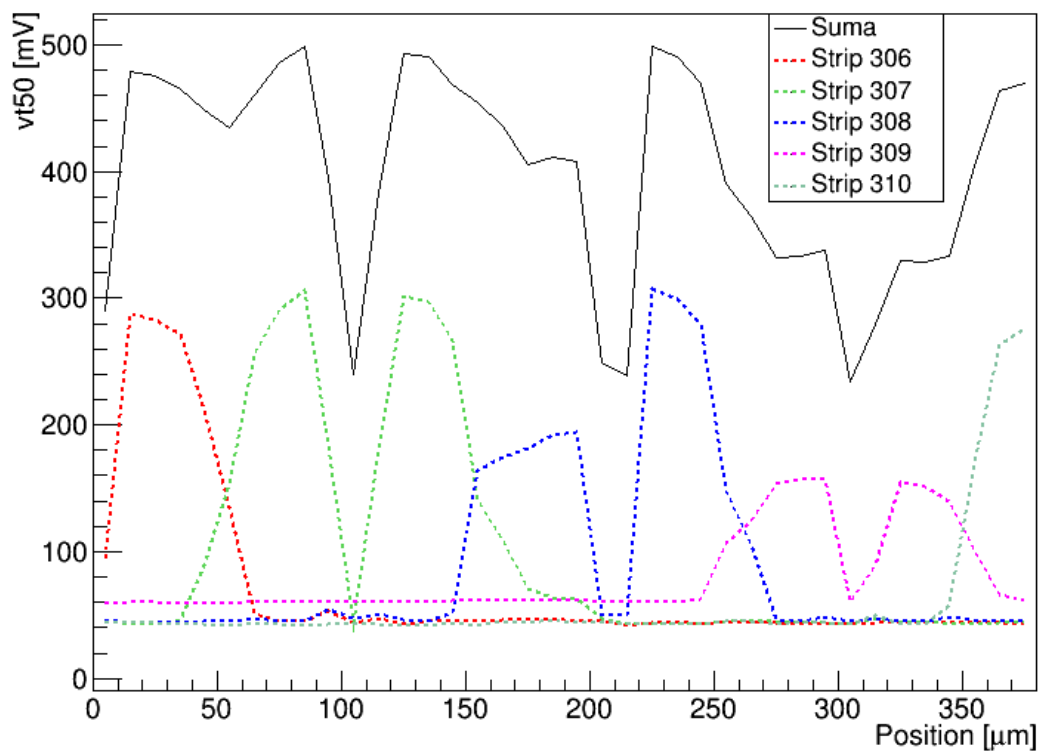
Jedno meranie, kde odozva stripov odpovedala očakávanej hodnote, bolo zopakované s krokom $2\text{ }\mu\text{m}$. Výsledný graf je zobrazený na obr. 5.6. Odozva je vyjadrená v mV aj vo fC, pričom na prepočet bola použitá 3PG priamka.



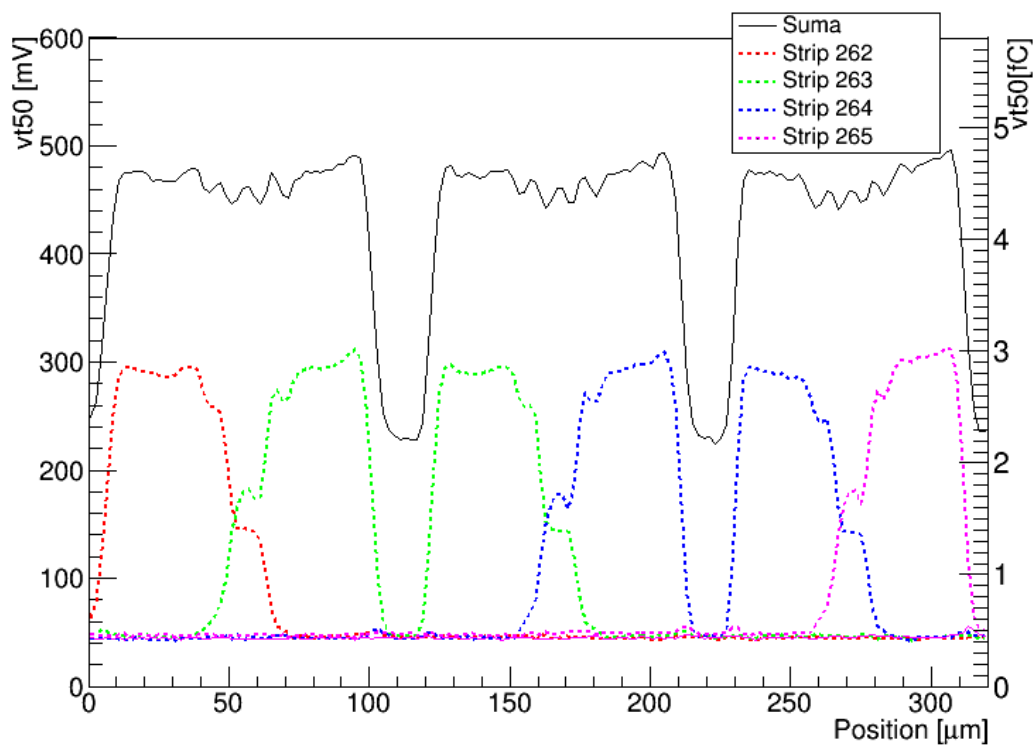
Obr. 5.3: Počet šumom obsadených stripov v závislosti na thresholde. Celkový počet stripov je 766. Vľavo situácia pri vypnutom napätí vyprázdnenia. Vpravo situácii pri zapnutom napätí vyprázdnenia.



Obr. 5.4: Závislosť odozvy detektoru na thresholde pre jednotlivé stripy. Vľavo situácia pri vypnutom napätí vyprázdnenia. Vpravo situácia pri zapnutom napätí vyprázdnenia.



Obr. 5.5: Závislosť vt_{50} na polohe laseru s krokom $10\ \mu\text{m}$. Z grafu sa dá vyčítať odozva z jednotlivých stripov daná bodom vt_{50} .



Obr. 5.6: Závislosť vt_{50} na polohe laseru s krokom $2\ \mu\text{m}$. Z grafu sa dá vyčítať odozva z jednotlivých stripov daná bodom vt_{50} .

6. Diskusia

6.1 Diskusia výsledkov merania

Na obr. 5.2 je jasne vidieť, že použitie prevodu pomocou 3PG je možné v rámci signálu do $500 \text{ mV} \approx 5 \text{ fC}$. V prípade vyššieho signálu je nutné na prepočet medzi mV a fC použiť response curve. Na použitie tejto krivky je však potrebné presné premeranie celého rozsahu výstupného signálu. Extrapolácia tejto krivky môže byť nepresná z dôvodu, že neexistuje analytický vzťah pre túto závislosť. Tvar tejto krivky za posledným nameraným bodom je síce odhadnuteľný, no z hľadiska možnej odchýlky od skutočnej hodnoty nepoužiteľný.

Z meranej úrovne šumu detektoru je zrejmé, že pripojením napätia vyprázdnenia sa vplyv šumu na meranie podstatne zníži. Pri noise occupancy scane na obr. 5.3, kde bol meraný počet obsadených stripov v závislosti na thresholde, je síce pri zapnutom napätí vyprázdnenia počet obsadených stripov na začiatku závislosti vyšší, no táto závislosť omnoho rýchlejšie klesá. Ideálny stav by bol ten, kedy by táto závislosť bola skoková funkcia. V našom prípade však už pri thresholde okolo 80 mV môžeme hovoriť o minime šumom obsadených stripov.

Veľkosť šumu, znázornená na obr. 5.4, je pri zapnutom napätí výrazne nižšia. Z týchto histogramov je taktiež viditeľný strmší pokles šumu so zvyšujúcim sa thresholdom pre prípad, kedy je napätie vyprázdnenia zapnuté.

Na podrobné testovanie odozvy stripov pomocou laseru bolo potrebné najskôr zaostriť laser na povrch detektora. To bolo prevedené podľa postupu uvedenom v kapitole 4.3.2. Tento postup bol potom opakovaný vždy pred prvým spustením merania v daný deň.

Šírka laserového zväzku na povrchu detektoru sa dá približne určiť zo strmosti nábehového signálu pri prechode lasera medzi stripom a aktívnou oblasťou na obr. 5.6. Ak predpokladáme gausovské rozloženie zväzku¹, tak vzdialenosť medzi minimom a maximom signálu je daná ako 3σ . Potom dostávame približnú šírku laserového zväzku $w \approx 3 \mu\text{m}^2$.

Správne zaostrenie lasera je viditeľné z obrázku 5.6, kde pri malom kroku je jasne viditeľný prechod medzi oblasťou nad stripom, kedy sa laserový zväzok odráža a oblasťou kde je laser tesne vedľa stripu, kedy vyčítame najvyšší signál.

Na obr. 5.5 aj pri použití väčšieho kroku vidíme defektné oblasti v okolí stripov 308 a 309. V prípade stripu 309 ide zjavne o chybné vyčítanie signálu zo stripu. Aj úroveň šumu je v prípade tohto stripu vyššia.

Strip 308 však vykazuje rozdielnú odozvu v prípade, že laserový zväzok dopadá sprava alebo zľava. V tomto prípade nemôžeme hovoriť o chybnom napojení stripu. Pravdepodobne sa jedná o chybu naniesenia odporovej vrstvy medzi stripy 307 a 308, ktorej význam je popísaný v kapitole 1.2.2. Toto tvrdenie podporuje aj odpovedajúca odozva zo stripu 207, ktorá neklesá dostatočne rýchlo oproti iným stripom.

Toto meranie však mohlo byť ovplyvnené aj nečistotami na testovanom module. Aj napriek filtrovaniu vzduchu v miestnosti sa môžu čiastočky prachu usadiť na meranom module.

¹To nie je úplne pravda, pretože tam dochádza k interferencii signálu.

²Z predchádzajúcich skúseností je šírka laserového pulzu približne $2,8 \mu\text{m}$ až $3,3 \mu\text{m}$.

Na obr. 5.6 sú pri signále z jednotlivých stripov viditeľné schodíky³ spôsobené štruktúrou nanesených vrstiev na povrch detektoru. Ide najmä o p^+ vrstvu, ktorá sa nanáša pod strip (viď obr. 1.1). Používa sa však aj v strede stripu, kde slúži na modifikáciu elektrického poľa tak, aby bol zozbieraný všetok vzniknutý náboj. Táto vrstva má odlišné optické vlastnosti, a teda odozva detektoru na dopadajúci zväzok sa líši.

Tento efekt je pozorovateľný iba pri testoch laserom. Pri použití β žiariča, alebo zväzku častíc na urýchľovači schodíky nepozorujeme. Dokonca aj použitie inej vlnovej dĺžky by mohlo viesť k vyrušeniu tohto efektu.

6.2 Mŕtve kanály

V rámci merania boli odhalené tzv. mŕtve kanály, teda stripy, ktorých odozva sa odlišovala od odozvy ostatných stripov. Tieto kanály sú viditeľné už pri noise occupancy scane na obr. 5.3, najmä v oblasti okolo stripu 300. Táto oblasť bola nascanovaná aj v rámci závislosti vt50 na polohe laseru na obr. 5.5, kde je jasne viditeľná oblasť defektných stripov.

Nefunkčnosť týchto stripov, prípadne ich slabá odozva, môžu byť spôsobené zlým napojením na vyčítací elektroniku, kde na mieste spojenia dochádza k veľkému úbytku signálu v dôsledku odporu. Poprípade môže byť tento strip úplne oddelený od vyčítacej elektroniky.

Množstvo mŕtvych kanálov sa dá minimalizovať, avšak nie úplne odstrániť. V rámci testovania detektorov je našou úlohou ich odhalenie, čím je možné signály z týchto stripov zamaskovať a ďalej s nimi nemerať. Po ich namontovaní nie je až tak výrazne ovplyvnená presnosť merania, pretože detektory sú umiestnené vo viacerých radoch.

Čo na danom module nepozorujeme, sú stripy, ktorých šum je vyšší ako signál zo zdroja žiarenia. Pokiaľ takéto stripy nie sú odhalené, môže sa zdať, že daným miestom preletela častica, čo ovplyvní presnosť merania.

³Napríklad pre strip 262 sa tieto schodíky nachádzajú približne na polohách $50\ \mu\text{m}$, $70\ \mu\text{m}$, $90\ \mu\text{m}$ a inverzne z opačnej strany stripu.

Závěr

Táto práca ukazuje prehľad o metódach a testovaní polovodičových detektorov pomocou laserového zdroja. Prvé tri kapitoly sú venované stručnému prehľadu teórie, potrebnej k pochopeniu funkčnosti polovodičových detektorov a ich aplikácii vo veľkých experimentoch.

V rámci práce bolo potrebné sa oboznámiť s konkrétnymi prístrojmi použitými pri testovaní a zvládnuť ich ovládanie. Tieto výsledky sú zhrnuté vo štvrtej kapitole.

Piata kapitola ukazuje autorove výsledky testovania detektoru. V rámci nej boli prevedené všetky potrebné scany uvedené v tretej kapitole, pričom jednotlivé grafy sú spracované do formátu, z ktorého je viditeľný požadovaný výsledok. Merania boli prevádzané opakovane na overenie správnosti výsledku. Interpretácia nameraných výsledkov je obsiahnutá v šiestej kapitole.

Výsledky, ktoré boli namerané, odpovedajú očakávaniam daným teóriou a predchádzajúcimi skúsenosťami. Prevedením tejto práce bol otestovaný proces testovania detektorov, ktorý bude potrebné prevádzať pri nových detektoroch vyrobených pre ATLAS Upgrade.

Zoznam použitej literatúry

- [1] Doležal Z. Polovodičové detektory v jaderné a subjaderné fyzice. http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/~dolezal/teach/semicon/semi_p.pdf. [cit. 2018-04-25].
- [2] R.P. Feynman, R.B. Leighton, and M. Sands. *Feynmanovy přednášky z fyziky* 3. Druhé opravené vydání. Fragment, Praha, 2013.
- [3] Experiment ATLAS. <https://atlas.cern/discover/detector>. [cit. 2018-04-28].
- [4] Vnútrotný detektor experimentu ATLAS. <https://atlas.cern/discover/detector/inner-detector>. [cit. 2018-04-28].
- [5] Magnetický systém. <https://atlas.cern/discover/detector/magnet-system>. [cit. 2018-05-01].
- [6] Pseudorapidita. <https://en.wikipedia.org/wiki/Pseudorapidity>. [cit. 2018-04-29].
- [7] ATLAS upgrade report. <https://cds.cern.ch/record/2257755/files/ATLAS-TDR-025.pdf>. [cit. 2018-04-30].
- [8] ROOT. <https://root.cern.ch/>.
- [9] Standa. <http://www.standa.lt/>.

Zoznam obrázkov

1.1	Schéma stripového (vľavo) a pixelového (vpravo) detektora. Na obrázku sú znázornené aj najčastejšie používané materiály a orientačné rozmery daných detektorov.	6
1.2	Princíp odporového delenia náboja. Nanesením odporovej vrstvy medzi elektródy sa vzniknutý náboj prerozdelení v pomere vzdialeností od jednotlivých stripov. Takto je možné určiť miesto prechodu častice.	7
2.1	Schéma experimentu ATLAS [3]	9
2.2	Schéma vnútorného detektora [4]	10
2.3	Podrobná schéma nového vnútorného detektora [7]	11
4.1	Schéma zapojenia prístrojov použitých na testovanie detektorov laserom.	14
4.2	Testovaný modul Petalet 250 vsadený do testovacieho rámu. . . .	15
4.3	Detail testovaného modulu Petalet 250. Číslo 1. je znázornená oblasť, na ktorú pri testovaní dopadal laserový zväzok.	15
4.4	HSIO karta zabezpečujúca rozhranie medzi vyčítacou elektronikou detektora a počítačom pomocou LAN káblu. Na tomto obrázku je zvýraznené, ktorým LEMO konektorom je HSIO pripojený ku generátoru pulzu.	16
4.5	Pracovné prostredie SCTDAQ. Vľavo je znázornené grafické okno, v ktorom sa spúšťajú základné scany. Vpravo je znázornené príkazové okno, v ktorom sa zobrazujú výsledky. Rôznymi príkazmi je možné ovládanie aj iba pomocou tohto okna.	17
4.6	Polohovací stolček STANDA 8MT167-100DCE2 [9]	18
4.7	Ovládač polohovacieho stolčeku STANDA 8SMC5 [9]	18
4.8	Polohy pre zaostrenie lasera. Pokiaľ je šírka laserového zväzku väčšia ako šírka stripu, môžeme z daného stripu vyčítavať signál. . .	19
5.1	Strobe delay scan s vyhodnotenými hodnotami najlepšieho oneskorenia. Tie sa po tomto scane nastavujú v konfiguračnom súbore. .	21
5.2	Response curve a three point gain. Po injektovaní pulzu o danej hodnote náboja meriame odozvu detektora v mV. Three point gain je zjednodušenie merania odozvy na lineárnu oblasť.	22
5.3	Počet šumom obsadených stripov v závislosti na thresholde. Celkový počet stripov je 766. Vľavo situácia pri vypnutom napätí vyprázdnenia. Vpravo situácii pri zapnutom napätí vyprázdnenia. . .	23
5.4	Závislosť odozvy detektora na thresholde pre jednotlivé stripy. Vľavo situácia pri vypnutom napätí vyprázdnenia. Vpravo situácia pri zapnutom napätí vyprázdnenia.	23
5.5	Závislosť vt50 na polohe lasera s krokom 10 μm . Z grafu sa dá vyčítať odozva z jednotlivých stripov daná bodom vt50.	24
5.6	Závislosť vt50 na polohe lasera s krokom 2 μm . Z grafu sa dá vyčítať odozva z jednotlivých stripov daná bodom vt50.	24

Zoznam tabuliek

4.1	Parametre generovaného pulzu	17
4.2	Základné parametre polohovacích stolčekov	18
4.3	Hodnoty napájacieho napätia	20
5.1	Výsledky fitu pri prepočte mV na fC	21

Zoznam použitých skratiek

3PG	Three point gain
ATLAS	A Toroidal LHC Apparatus
AV ČR	Akadémia vied Českej republiky
CERN	Európske laboratórium fyziky častíc
CR1	Čistá miestnosť 1 (Clean Room 1)
ER	Elektronická miestnosť (Electronic room)
HSIO	Vysokorýchlostný vyčítací čip (High Speed Input Output)
ID	Vnútorý detektor ATLASu (Inner Detector)
ITk	Vnútorý detektor ATLAS Upgrade (Inner Tracker)
LHC	Veľký hadrónový urýchľovač (Large Hadron Colider)
SCT	Kremíkový stripový detektor (Semiconductor tracker)
SLAC	Stanfordský lineárny urýchľovač (Stanford Lin. Accelerator Center)
ÚČJF	Ústav časticovej a jadrovej fyziky

A. Prílohy

A.1 Použitie makro

```
#include "DoLTPlots.cpp"

void Threshold_Scan_HSI0_MM(){

    int direction = 2;           // x = 1, y = 2, z = 3
    float distance = -0.002;     // one step in mm
    int n = 200;                 // number of threshold scans
    int VThr_start = 0;
    int VThr_stop = 500;
    float VThr_step = 6.4;
    int Ntrigs = 50;
    int StartRunNo = e->runnum;
    int StartScanNo = e->scannum + 1;

    //Scan + movement
    st_menu_set_trigger(0);      //change to L1A trigger
    e->burst_ntrigs = Ntrigs;    // set number of triggers
    e->ConfigureScan(1, VThr_start,
        VThr_stop, VThr_step);  // it sets parameters of scan
    TString command;
    int debug = 0;
    command = Form("START e:/CleanRoom1/execs/TStanda22015.exe %i
        e:/CleanRoom1/cfg/StandaConsistenceList.cfg %f %i",
        direction, distance, debug);
    for (int i=0; i<n; i++) {
        st_scan(8,-1);           // it runs Threshold scan
        printf("Movement to %f mm (+ to back/- to front) in y.\n",
            distance);
        gSystem->Exec(command.Data());
        gSystem->Sleep(2000);
    }

    //Return to start position
    distance = -distance * n;
    command = Form("START e:/CleanRoom1/execs/TStanda22015.exe %i
        e:/CleanRoom1/cfg/StandaConsistenceList.cfg %f %i",
        direction, distance, debug);
    printf("Movement to %f mm (+ to back/- to front) in y.\n",
        -distance);
    gSystem->Exec(command.Data());
```



```

//Print a graph
int flag = 0;
int RCRunNo = 1957;    //runnum of Response curve scan
int RCScanNo = 10;
int NStrips = 5;
int StripStart = 265 - 3;
DoLTPlots(flag, StartRunNo, StartScanNo, n + (2 * flag),
    fabs(distance), RCRunNo, RCScanNo, StripStart, NStrips, 0 );

gSystem->Sleep(10000);
}

```